

AUSWIRKUNGEN UNTERSCHIEDLICHER ANFLUGVERFAHREN AUF DEN TREIBSTOFFVERBRAUCH AUF GRUNDLAGE OPERATIONELLER FLUGBETRIEBSDATEN

M. Scholz, V. Senske

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Flugsystemtechnik

Lilienthalplatz 7, 38108 Braunschweig, Deutschland

Zusammenfassung

Die Umsetzung energieeffizienter Anflugverfahren zählt zu den kurz- und mittelfristigen Minderungsmaßnahmen des Treibstoffverbrauchs und des emittierten Flugzeuglärms. In der Vergangenheit wurden zahlreiche theoretische Untersuchungen diesbezüglich durchgeführt, die jedoch nicht alle Einflüsse gesamtheitlich abbilden konnten. Dem DLR-Institut für Flugsystemtechnik liegen ca. 160 000 Datensätze realer Flugbetriebsdaten des Flugzeugtyps Boeing 737 einer Fluggesellschaft vor. Somit können die unterschiedlichen Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch der im realen Flugbetrieb geflogenen Anflugverfahren aufgezeigt werden. Für die Kategorisierung der Anflüge ist ein Algorithmus entwickelt worden, der die Anflugverfahren anhand des vertikalen Flugprofils und des Schubverlaufes automatisiert voneinander unterscheidet. In der Untersuchung sind folgende Anflugverfahren berücksichtigt: Continuous Descend Approach, Advanced Continuous Descend Approach, Segmented Continuous Descend Approach, Low Drag Low Power, Optimized Low Drag Low Power.

Keywords

Anflugverfahren; Flugbetriebsdaten; Treibstoffverbrauch; LNAS

NOMENKLATUR UND ABKÜRZUNGEN

γ	Bahnneigungswinkel
s	definierte Flugdistanz
ACDA	Advanced CDA
ATRA	Advanced Technology Research Aircraft
CDA	Continuous Descend Approach
EFB	Electronic Flight Bag
IAC	Instrument Approach Chart
ICAO	International Civil Aviation Organization
LDLP	Low Drag Low Power
LNAS	Low Noise Augmentation System
N1	Drehzahl der Niederdruckwelle (Fandrehzahl)
OLDLP	Optimized LDLP
SCDA	Segmented CDA
VREF	Referenzgeschwindigkeit

1. EINLEITUNG

Mit 1,7% mehr Flugbewegungen als im Vorjahr fanden im Jahr 2017 über 2 Millionen An- und Abflüge an deutschen Verkehrsflughäfen statt. Fast die Hälfte der Anflüge erfolgte an den Drehkreuzen Frankfurt, München und Düsseldorf, die zum Vorjahr eine Verkehrszunahme von je 2,7%, 2,6% und 1,9% verzeichnen konnten [1]. Neben der daraus folgenden steigenden Anzahl von Lärmereignissen, wirkt sich das anhaltende Wachstum auch auf die Schadstoffemission des Luftverkehrs aus, die es im Zuge der Unternehmensverantwortung zu senken gilt [2]. Die technologischen Innovationen werden in Zukunft auf-

grund des starken Luftfahrtwachstums womöglich nicht ausreichen, um die Schadstoffemissionen des gesamtheitlichen Luftverkehrs zu senken. Umso wichtiger sind neue Konzepte, die den Fluggesellschaften finanzielle Anreize durch lärm- und schadstoffabhängige Landegebühren bieten. Ziel ist es, dass Fluggesellschaften die Flugzeugflotten auf dem neusten technologischen Stand betreiben und Innovationen in den operationellen Regelbetrieb übernehmen, um somit die Flugzeugemissionen zu reduzieren. Obwohl die Modernisierung der Flugzeugflotte eine hohe Investition bedeutet, geht der höhere Effizienzgrad moderner Triebwerke bzgl. des Treibstoffverbrauches mit deutlichem Einsparungspotential einher [3].

Aufgrund langer Entwicklungs- und Betriebszeiten verzögert sich allerdings die Umstellung auf moderne emissionsarme Flugzeuge, sodass weitere Maßnahmen zur Reduktion von Flugzeugemissionen sinnvoll erscheinen. Neuentwicklungen zielen darauf ab, den Treibstoffverbrauch und damit die Schadstoffemissionen direkt am Triebwerk und durch aerodynamische Widerstandsreduzierungen am Flugzeug selbst zu senken. Da jedoch die Entwicklungszeiten neuer Flugzeuge, aber auch die Betriebszeiten aktueller Modelle, sehr groß sind, ist das Modellieren neuer operationeller Abläufe bei Anflugverfahren eine mögliche Maßnahme. [4]

Untersuchungen des Flugverkehrs führten zu dem Ergebnis, dass der Fluglärm im Anflug zwischen 3 dB und 12 dB reduziert und die Lärmkonturen um 8% bis 36% verklei-

nert werden können. Außerdem kann pro Anflug die Emission von CO₂, HC und NO_x bis zu 35% und der Treibstoffverbrauch um 23 kg bis 454 kg verringert werden. Während diese positive Bilanz für Zeiten geringen Verkehrsaufkommens gilt, erschwert sich das Einführen von operationellen Verfahren in hochfrequentierten Zeiten infolge einer möglichen Kapazitätseinschränkung. [5] Speziell bei Anflugverfahren können neue Lösungsansätze die Flugzeugemissionen senken. Beispielsweise unterstützt das Pilotenassistenzsystem LNAS den Piloten bei der Ausführung eines energieeffizienten Anfluges, indem Handlungsempfehlungen zur Wahl des Höhen-, Geschwindigkeits- sowie Konfigurationsmanagements bereitgestellt werden. Des Weiteren ist eine Effizienzerhöhung durch Unterstützung der Flugsicherung sowie des Piloten bei der Wahl des Top of Descent und der Vorhersage des vertikalen Flugprofils durch adaptive Flugmanagementsysteme denkbar.

Die Ausführung eines Anfluges ist vom Piloten, den Vorgaben der Flugsicherung und den meteorologischen Bedingungen abhängig, welche den Treibstoffverbrauch sowie die resultierende Lärmimmission im Wesentlichen beeinflussen. Anhand der Flugbetriebsdaten ermöglicht die Kategorisierung der unterschiedlichen Anflugverfahren eine detaillierte Beschreibung der Vor- und Nachteile des jeweiligen Anflugverfahrens bezüglich der bereits genannten Emissionen.

2. KATEGORISIERUNG DER ANFLÜGE

2.1 Anflugflugverfahren

Verschiedene Anflugverfahren besitzen unterschiedliche Charakteristiken im Vertikalprofil, dem Konfigurations- sowie dem Geschwindigkeitsmanagement des Flugzeuges. Sie unterscheiden sich im Abbau der potentiellen und kinetischen Energie des Flugzeuges. Ziel ist es, in einer Höhe von 1000 ft über Grund die Stabilitätskriterien zu erfüllen, um anschließend die Landung durchzuführen. Im

BILD 1 sind die zu untersuchenden Anflugverfahren schematisch für einen Airbus mit den Konfigurationsstufen Flaps 1, 2, 3 und FULL dargestellt.

Das Low Drag Low Power (LDLP) Anflugverfahren wird standardmäßig im operationellen Flugbetrieb angewandt. Bei diesem Verfahren sinkt das Flugzeug mit möglichst konstanter Geschwindigkeit auf die Zwischenanflughöhe, baut dort kinetische Energie ab und fliegt in den Gleitpfad ein. Erreicht das Flugzeug die Zwischenanflughöhe, im Vergleich zu einer optimalen Ausführung, zu früh, muss das Schubniveau entsprechend erhöht werden. Bei zu spätem Erreichen der Zwischenanflughöhe, sind ggf. die Bremsklappen oder sogar das Fahrwerk früher auszufahren, wobei beide Effekte nachteilig auf den Kerosinverbrauch und die Lärmemission wirken können. Das zu frühe oder späte Erreichen der Zwischenanflughöhe kann durch das Optimized Low Drag Low Power (OLDLP) Verfahren eliminiert werden, indem die Länge der Zwischenanflughöhe soweit verändert wird, dass keine Schuberrhöhung oder das Setzen der Bremsklappen nötig ist und der gesamte Anflug möglichst mit Leerlaufschub erfolgt.

Als konsequente Weiterentwicklung der bisherigen Verfahrensoptimierungen erscheint es sinnvoll, auf die Zwischenanflughöhe zu verzichten und einen Sinkflug mit kontinuierlichem Übergang auf den Gleitpfad durchzuführen. Um mit dem sogenannten Continuous Descent Approach (CDA) Verfahren die Endanfluggeschwindigkeit auf einem Sinkflugsegment zu erreichen, ist der gleichzeitige Abbau von kinetischer und potentieller Energie nötig. Der entsprechende Flugabschnitt wird Shared Energy Segment genannt und bedingt Konfigurationsänderungen des Hochauftriebsystems während des kontinuierlichen Sinkfluges vor dem Gleitpfadeinflug.

Das Advanced Continuous Descent Approach (ACDA) Verfahren verfolgt das Ziel der größtmöglichen Anhebung des Anflugprofils. Es befindet sich damit an der fliegbaren Grenze, um den Anflug konform zur geltenden Prozedur auszuführen. Das Flugzeug muss bereits in einer Höhe von z.B. 7000 ft die Geschwindigkeit soweit reduzieren,

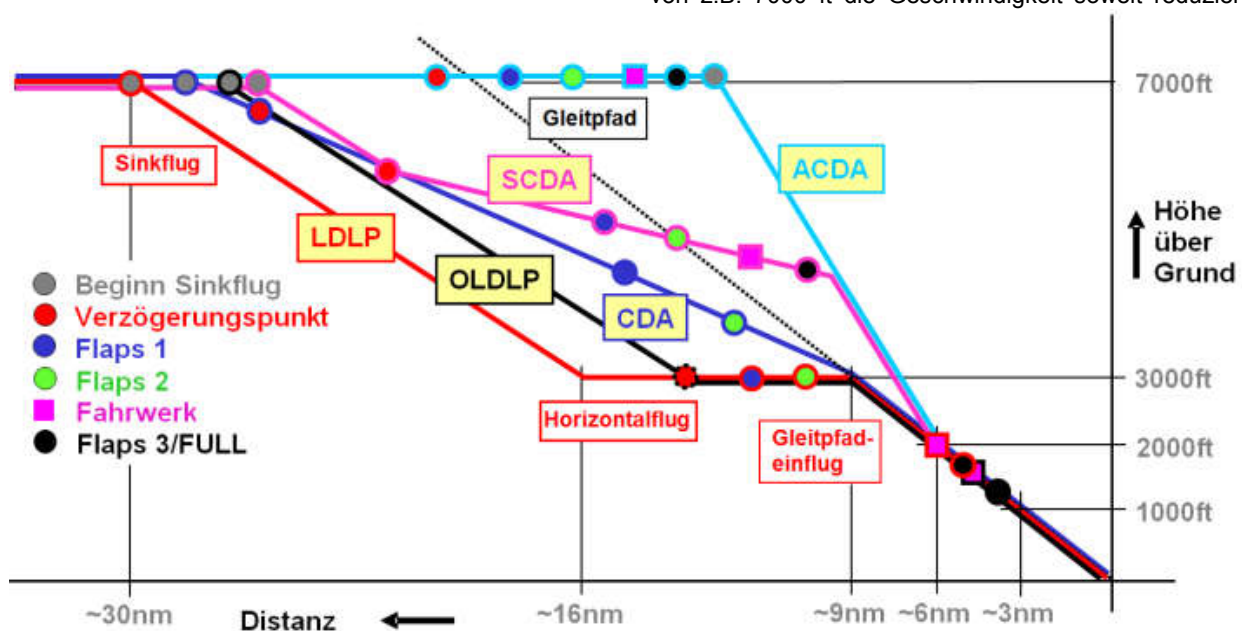


BILD 1. Höhenprofile unterschiedlicher Anflugverfahren

dass die Landeklappen ausgefahren werden können.

Mit ausgefahrenen Landeklappen und Fahrwerk erhöht sich der Widerstand, was den Steilanflug (Flugbahnwinkel betragsmäßig größer als der Gleitpfadwinkel) und den Gleitfadeinflug von oben ermöglicht. Seine praktische Bedeutung ist jedoch wegen der extrem geringen Fehler-toleranz gering, da ein zu spätes Einleiten des Sinkflugs ggf. zu einem notwendigen Abbruch des Anfluges führen kann. Hingegen dazu ist das Segmented Continuous Descent Approach (SCDA) Verfahren in Segmente vor dem Gleitfadeinflug unterteilt, bei denen anfangs mit konstanter Geschwindigkeit gesunken und ab dem Verzögerungspunkt wie beim CDA-Verfahren kinetische und potentielle Energie zur gleichen Zeit abgebaut wird. Dieses Verfahren zeichnet sich durch eine Schubminimierung während des gesamten Anfluges und durch eine im Vergleich zum CDA-/LDLP-Verfahren höher liegende Bahn sowie dem Gleitfadeinflug von oben aus.

2.2 Algorithmus der Kategorisierung

Die International Civil Aviation Organization (ICAO) unterscheidet im Anflug zwei operationelle Verfahren, das LDLP und das CDA-Verfahren. Das LDLP-Verfahren besitzt keine quantitative Einschränkung, während dessen das CDA-Verfahren unterhalb von 6000 ft stattfindet und der horizontale Abschnitt vor dem Gleitfadeinflug maximal 2,5 NM einnehmen darf. [6]

Im ersten Schritt detektiert der Algorithmus Flugabschnitte mit konstanter Flughöhe, was eine Kategorisierung der Anflugverfahren (vgl. Kapitel 2.1) in kontinuierliche und nicht-kontinuierlichen Anflüge ermöglicht. Der zu untersuchende Anflugbereich ist auf 30 NM Entfernung zur Landebahnschwelle begrenzt. Die Flugentfernung ist dabei über den zeitlichen Verlauf der Flugzeugposition berechnet, wodurch aufgrund der variablen Fluggeschwindigkeit keine äquidistanten Entfernungsschrittweiten vorliegen. Ob ein horizontaler Flugabschnitt existiert, ist durch die Detektion eines Entfernungsbereiches, der die ICAO Bedingung einer 2,5 NM Horizontalflugdistanz erfüllt, durch einen iterativen Prozess für jede Zeitscheibe bis zur Landebahnschwelle zu überprüfen.

BILD 2 zeigt schematisch ein nicht-kontinuierliches vertikales Flugprofil, in dem die Balken (rot und grün) die minimale Horizontalflugdistanz von 2,5 NM widerspiegeln. Die Höhe am linken Ende des Balkens zwischen H1 und H2 entspricht nicht der am rechten Ende des Balkens (H1≠H2), sodass die Horizontalflugbedingung nicht erfüllt ist. Diese Bedingung wird schrittweise für den gesamten Entfernungsbereich des Anfluges überprüft. Auch zwischen H3 und H4 ist kein Horizontalflugabschnitt detektiert, obwohl bereits ein horizontaler Abschnitt von 2 NM vorhanden ist.

Erst wenn die Flughöhe der linken Grenze der Höhe der rechten Grenze entspricht, konnte ein Horizontalflugsegment detektiert werden (vgl. BILD 2 zwischen 17,5 NM und 20 NM, H5=H6). Durch den iterierenden Algorithmus wird beispielhaft zwischen 10 NM und 12,5 NM das letzte Segment mit erfüllter Höhenbedingung (H7=H8) detektiert,

wobei das folgende Segment zwischen H9 und H10 die Horizontalflugbedingung erneut nicht erfüllt.

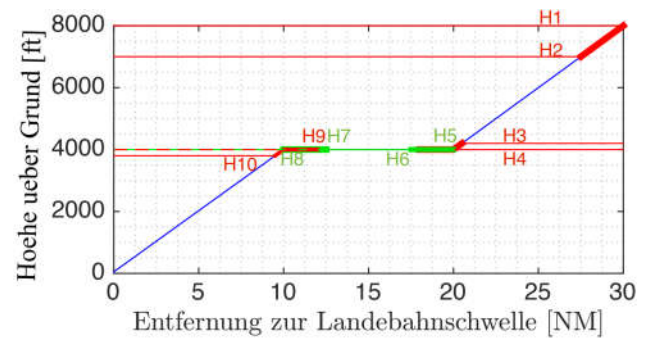


BILD 2. Unterscheidung nicht-/kontinuierlicher Verfahren

Bei der Bewertung der horizontalen Flugabschnitte ist zu beachten, dass z.B. durch Inversionswetterlagen auftretende konstante barometrische Flughöhen nicht als beabsichtigte horizontale Segmente gewertet werden. Da keine Datenaufzeichnungen der GPS Flughöhe zur Verfügung stehen, wurde eine Höhendifferenz zur Steuerung der Sensitivität eingeführt. Diese berechnet sich aus

$$(1) \quad \Delta H = \tan(|\gamma_{\max}|) \cdot s,$$

wobei γ_{\max} den angenommenen mittleren Flugbahnwinkel und s die vorgegebene Flugdistanz von 2,5 NM des zu betrachtenden Entfernungsbereichs definiert. In der Kategorisierung wurde ein maximaler Bahnneigungswinkel von $\gamma_{\max} = -1^\circ$ gewählt, woraus sich eine Höhendifferenz von $\Delta H = 265$ ft ergibt. Befindet sich die aufgezeichnete barometrische Höhe innerhalb der vorgegebenen Flugdistanz im Bereich von ΔH ($|\gamma| \leq |\gamma_{\max}|$) und unter 6000 ft über Grund, wird dieses Segment als Horizontalflug gewertet. BILD 3 zeigt einen prozessierten realen nicht-kontinuierlichen Anflug, bei dem die rot-gestrichelten Linien den detektierten Entfernungsbereich mit erfüllter Horizontalbedingung kennzeichnen. Im zweiten Schritt erfolgt die Prüfung, bei welchen Anflügen es sich aus der Gruppe der kontinuierlichen Verfahren um Steilflughangverfahren wie SCDA- und ACDA-Verfahren handelt. Um CDA-Verfahren von Steilflughangverfahren zu unterscheiden, wird der Einflug in den Gleitpfad untersucht. Dies erfolgt über einen Vergleich der aktuellen Flughöhe und der Sollflughöhe auf dem Gleitpfad in einer entsprechenden Entfernung zur Landebahnschwelle.

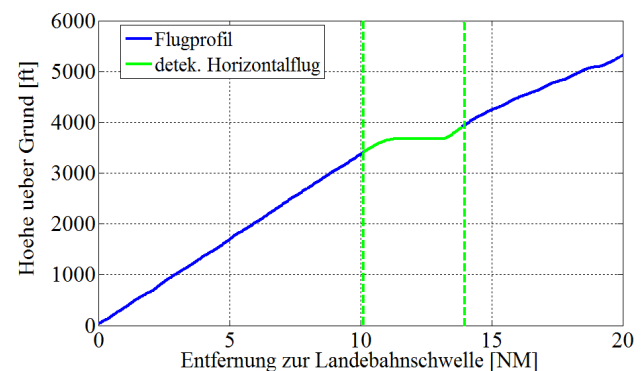


BILD 3. Nicht-kontinuierlicher realer Anflug

CDA Anflüge schneiden per Definition den Gleitpfad von unten und SCDA und ACDA Anflüge von oben, wobei im operationellen Flugbetrieb der Einflug auf den Gleitpfad um mehrere nautische Meilen variiert. Da kontinuierliche Anflüge in unterschiedlichen Entfernungen und dementsprechend in unterschiedlichen Flughöhen in den Gleitpfad einfliegen, ist die weitere differenzierte Unterteilung nicht an eine Höhenbedingung in einer bestimmten Entfernung gekoppelt. Stattdessen erfolgt eine Überprüfung der Höhenbedingung in dem Entfernungsbereich zwischen dem vorgesehenen Gleitpadeinflugpunkt (veröffentlicht in der Instrument Approach Chart (IAC) jeder Landebahn) und den dahinterliegenden 5 NM, wie in BILD 4 dargestellt.

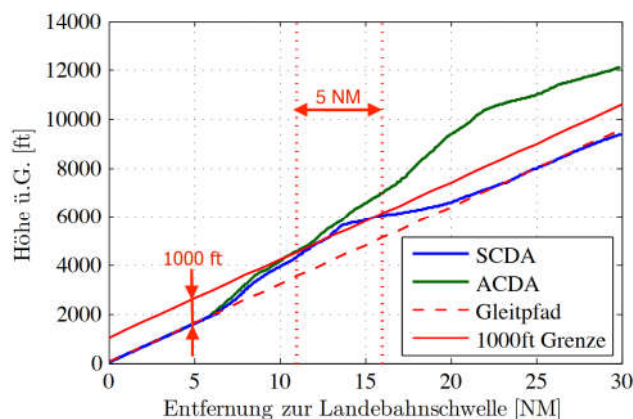


BILD 4. Unterteilung ACDA und SCDA Verfahren

Als Höhenbedingung für Steilanflugverfahren wird definiert, dass sich das Flugzeug mindestens 1000 Fuß über der verlängerten Gleitpfadhöhe in dem genannten Entfernungsbereich befindet. Sofern der Grenzwert von 1000 ft überschritten wird, handelt es sich um ein kontinuierliches Steilanflugverfahren (ACDA oder SCDA), das wiederum nochmals zu unterteilen ist. Kennzeichnend für den ACDA ist der steile Sinkflug aus größerer Höhe (im Algorithmus: der letzter horizontale Abschnitt), woraus folgt, dass die Flughöhe des gesamten Anfluges größer als die der verlängerten Gleitpfadhöhe ist. Somit wird ein Anflug als ACDA gewertet, sobald sich das Flugzeug ab dem Verlassen des letzten horizontalen Segments bis zu dem im Algorithmus ermittelten Gleitpadeinflugpunkt mindestens 1000 ft oberhalb des verlängerten Gleitpfades befindet. Das SCDA-Verfahren besitzt im Vergleich dazu Segmente mit betragsmäßig kleineren Flugbahnwinkeln, um neben dem Abbau der Flughöhe auch den der Fluggeschwindigkeit zu gewährleisten. Wird der Gleitpfad von oben angeschnitten, aber ist die Höhendifferenz auf den betrachteten 5 NM nicht größer als 1000 ft, wird der Anflug als SCDA kategorisiert (vgl. BILD 4).

Im letzten Schritt werden die nicht kontinuierlichen Anflugverfahren nach LDLP bzw. OLDLP kategorisiert. Für diese Anflüge wird das Schubverhalten zur weiteren Unterscheidung herangezogen. Um die OLDLP-Verfahren differenziert von den LDLP-Verfahren betrachten zu können, muss das OLDLP-Verfahren bis zu einer Höhe von 2000 ft im Leerlauf durchgeführt werden. Die Umsetzung der Schubbedingung erfolgt durch die Betrachtung der N1-

Drehzahlen beider Triebwerke. Bei der Untersuchung werden Fandrehzahlen unterhalb 40% als Leerlaufdrehzahl angenommen. Darüber hinaus werden der letzte horizontale Abschnitt und die Zwischenanflughöhe vor dem Einflug auf den Gleitpfad untersucht. Befinden sich die Triebwerke in diesem Entfernungsbereich nicht im Triebwerksleerlauf, handelt es sich um einen LDLP Anflug.

Insgesamt konnten nach der Datenaufbereitung 162.187 Anflüge auf 25 internationale Flughäfen bzw. 78 Landebahnen mithilfe des entwickelten Algorithmus kategorisiert werden. Die verschiedenen Anflugverfahren sind wie folgt vertreten:

- LDLP: 91678 (56,5%)
- OLDLP: 11308 (7%)
- CDA: 57559 (35,5%)
- ACDA: 357 (0,2%)
- SCDA: 1285 (0,8%)

Davon wurden 104469 Anflüge in Deutschland durchgeführt.

3. ERGEBNISSE DER UNTERSUCHUNG

Alle Anflüge unterscheiden sich voneinander, auch wenn sie nach gleichen Verfahren, mit gleichem Anfangszustand des Flugzeuges, mit gleichen Anweisungen der Luftverkehrskontrolle, unter ähnlichen atmosphärischen Bedingungen sowie gleichen Prozeduren ausgeführt werden. Grund dafür liegt im individuellen Verhalten der Piloten, was in unterschiedlichen Höhen-, Geschwindigkeitsverläufen und Konfigurationsabläufen resultiert. Um die Vergleichbarkeit der Anflüge zu gewährleisten, sind lediglich Anflüge berücksichtigt, die in 1000 ft über Grund die im Folgenden beschriebenen Stabilisierungsbedingungen erfüllen:

- Flugzeug befindet sich auf dem korrekten vertikalen/lateralen Flugpfad
- Fluggeschwindigkeit zwischen VREF und VREF+20
- Landekonfiguration gesetzt
- Schubeinstellung entsprechend der Konfiguration zum Beibehalten der Fluggeschwindigkeit
- maximale Ablage (vertikal/lateral) vom ILS 1 Dot

Zu jeder Landebahn eines Flughafens existieren entsprechende Anflugkarten, die den Piloten grundlegende Informationen zum Ablauf des Anfluges bereitstellen. Neben dem zugelassenen lateralen Anflugprofil sind beispielsweise Informationen zum Instrumentenanflug, der Zwischenanflughöhe und dem Gleitpfadwinkel verfügbar. Jedoch operieren nicht alle Flughäfen nach denselben Rahmenbedingungen, sodass sich die Piloten an unterschiedlichen Flughäfen u.a. mit verschiedenen Zwischenanflughöhen und Gleitpfadwinkeln auseinander setzen müssen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung für eine in Deutschland befindliche Landebahn vorgestellt. Tabelle 1 zeigt exemplarisch den prozentualen Anteil der Anflüge, die die genannten Stabilisierungsbedingungen an

einer Landebahn eines deutschen Flughafens erfüllen.

Tabelle 1. Anteil der in 1000 ft ü.G. stabilisierten Anflüge

Anflugverfahren				
LDLP	OLDLP	CDA	SCDA	ACDA
91%	96%	91%	92%	67%

Insgesamt erfüllen 4643 Anflüge an der untersuchten Landebahn in 1000 ft über Grund die Stabilitätsbedingungen, wobei die Anflugverfahren wie folgt vertreten sind:

- LDLP: 3713 (80%)
- OLDLP: 68 (1,5%)
- CDA: 831 (17,9%)
- ACDA: 6 (0,1%)
- SCDA: 25 (0,5%)

Es ist ein deutlicher Unterschied in der relativen Häufigkeit der einzelnen geflogenen Verfahren zwischen der ausgewählten Landebahn und der gesamtheitlichen Betrachtung erkennbar, was auf den unterschiedlichen Betrieb und der Kapazitätsauslastung des jeweiligen Flughafens zurückzuführen ist. Der prozentuale Anteil der CDA-Verfahren ist nahezu halbiert, wohingegen der Anteil der LDLP-Verfahren von 56,5% auf 80% ansteigt. Darüber hinaus werden prozentual weniger OLDLP-Verfahren geflogen.

Im BILD 5 sind die Vertikalprofile der zur Verfügung stehenden Flugbetriebsdaten, sortiert nach dem jeweiligen Anflugverfahren, abgebildet. Die Darstellung der LDLP-Anflüge zeigt, dass die Flugzeuge von der Luftverkehrskontrolle bei sehr unterschiedlichen Entfernungen zur Landebahnschwelle zum Sinkflug auf die Zwischenanflug-

höhe angewiesen werden, sodass sich teilweise Flugzeuge bereits mehr als 30 NM vor der Landebahnschwelle (ca. 19 NM vor dem Gleitfahneinflug) im Horizontalflug in 4000ft Höhe befinden. Die Darstellung des OLDLP-Verfahren veranschaulicht deutlich, dass die Zwischenanflughöhe lediglich zur Geschwindigkeitsreduktion genutzt wird, da per Verfahrensdefinition der Anflug im Triebwerksleerlauf ausgeführt wird.

Neben den nicht-kontinuierlichen weisen auch die kontinuierlichen Anflugverfahren (CDA, ACDA, SCDA) die erwarteten Höhenverläufe auf. Das in BILD 5 gezeigte CDA*-Verfahren unterscheidet sich vom CDA-Verfahren dahingehend, dass der Anflug im Triebwerksleerlauf stattfindet. Insgesamt erfüllen lediglich 15% der untersuchten CDA-Verfahren die Kriterien des CDA*-Anfluges.

3.1 Treibstoffverbrauch

Für den Vergleich der Treibstoffverbräuche der verschiedenen Anflugverfahren wird der Treibstoffdurchfluss beider Triebwerke addiert und in dem Flugabschnitt zwischen 30 NM vor der Landebahnschwelle bis zum Erreichen der Stabilisationshöhe in 1000 ft (ca. 3 NM) zeitlich integriert.

BILD 6 zeigt die nach den Anflugverfahren gruppierten Treibstoffverbräuche der einzelnen Anflüge als dunkelblaue Punkte. Aus den einzelnen Treibstoffverbräuchen wurde für jedes Anflugverfahren der Median (schwarz) sowie der Quartilabstand (hellblau) berechnet und in der Grafik visualisiert.

Das LDLP-Verfahren (80% der Anflüge auf dieser Landebahn) weist den größten Streubereich mit Treibstoffver-

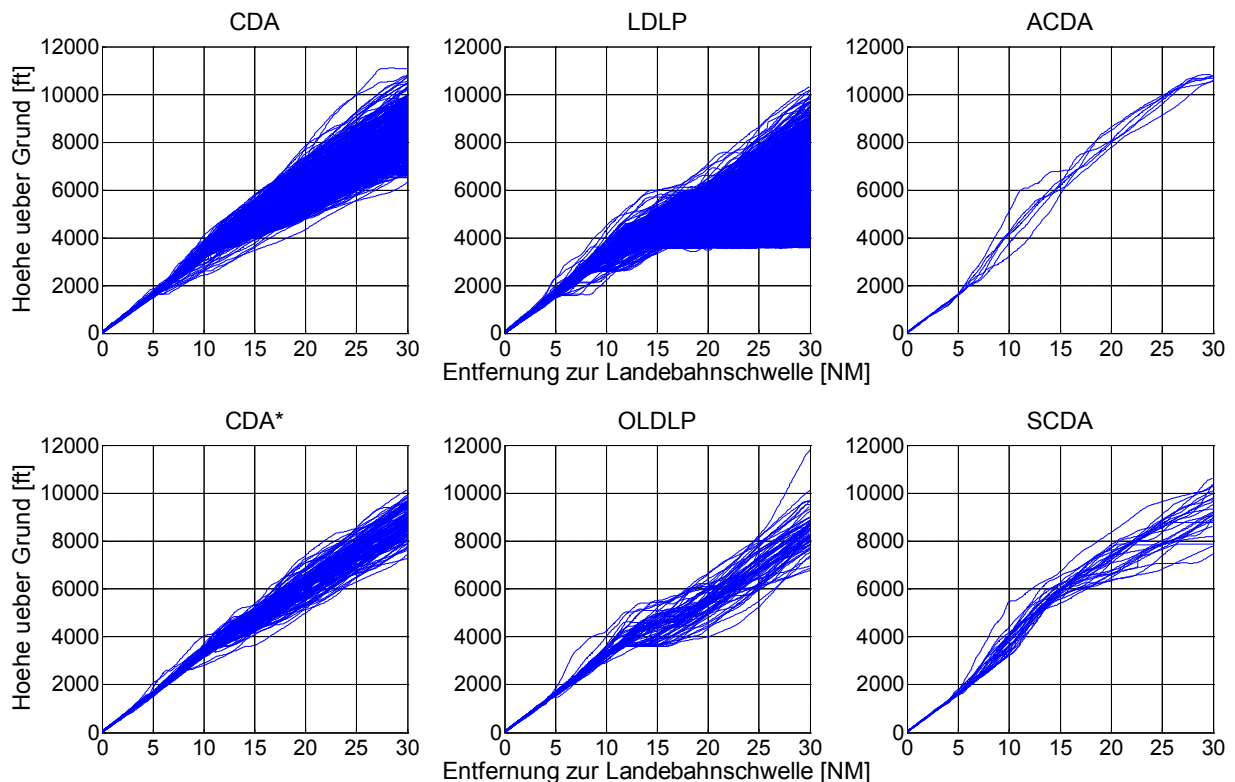


BILD 5. Vertikalprofile der untersuchten Anflugverfahren

bräuchen zwischen 78 kg und 422 kg auf, wobei der Treibstoffverbrauch des 25%- und 75%-Quartils 146 kg bzw. 210 kg und der Median 171 kg beträgt. Der vergleichsweise hohe Treibstoffverbrauch ist auf das typische Ausführungsmuster des LDLP-Verfahrens zurückzuführen, bei dem die Flugzeuge bereits sehr früh von der Luftverkehrskontrolle zum Sinkflug auf die Zwischenanflughöhe angewiesen werden (vgl. BILD 5). Mit dieser Vorgehensweise gewährleistet die Luftverkehrskontrolle in hochfrequentierten Zeiten in Kombination mit Geschwindigkeitsvorgaben die Aufrechterhaltung der Staffelungsabstände. Um den Vorgaben Folge zu leisten, ist ggf. in dieser Situation eine Schuberrhöhung unausweichlich, woraus ein höherer Treibstoffverbrauch sowie eine höhere Lärmbelastung resultieren.

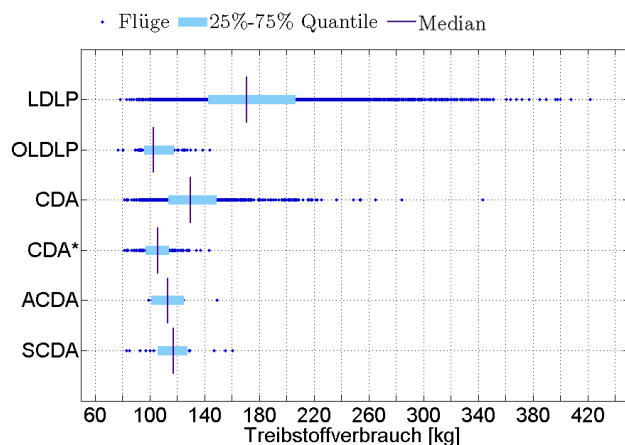


BILD 6. Treibstoffverbräuche, gruppiert nach Verfahren

Im Vergleich dazu liegen beim OLDLP-Verfahren ein geringerer Treibstoffverbrauch sowie ein kleinerer Streubereich der Treibverbräuche vor, was durch die Ausführung des Verfahrens im Triebwerksleerlauf begründet ist. Im Unterschied zum CDA-Verfahren gilt beim CDA*-Verfahren die Bedingung, dass der Anflug ebenso wie beim OLDLP-Verfahren im Triebwerksleerlauf ausgeführt werden muss. Daher sind die Treibstoffverbräuche der CDA*-Anflüge ähnlich zu den der OLDLP. Der Quartilabstand von 21 kg (25/75%-Quartil: 96kg/117kg) folgt hauptsächlich aus den unterschiedlichen Fluggeschwindigkeiten und atmosphärischen Bedingungen. Der Median der CDA-Verfahren beträgt 130 kg mit einem Quartilabstand von 35 kg (25/75%-Quartil: 114kg/149kg) und ist somit 41 kg geringer als bei den LDLP-Verfahren. Dadurch, dass das CDA nicht zwangsläufig im Triebwerksleerlauf ausgeführt wird, beeinflussen Flugzeuggewicht, Fluggeschwindigkeit, ATC-Vorgaben sowie atmosphärische Bedingungen das Schubverhalten und führen zu Treibstoffverbräuchen zwischen 90 kg und 340 kg. Der Quartilbereich des deutlich weniger geflogenen SCDA-Verfahren liegt zwischen 106 kg und 127 kg und benötigt ca. 13 kg weniger Kerosin als das CDA-Verfahren. ACDA-Verfahren werden am seltensten geflogen und weisen einen Treibstoffverbrauch zwischen 99 kg und 149 kg auf. Jedoch ist aufgrund der geringen Anfluganzahl von SCDA- und ACDA-Anflügen die statistische Aussagefähigkeit nur bedingt gegeben.

In BILD 7 ist der mittlere Treibstoffverbrauch des jeweiligen Verfahrens in Abhängigkeit der Entfernung zur Landebahnschwelle veranschaulicht. Anhand dieser Darstel-

lung sind Entfernungsbereiche mit erhöhten Treibstoffdurchflüssen sowie verfahrensspezifische Charakteristika ersichtlich. Zwischen 30 NM und 27 NM zeigen die mittleren Treibstoffverbräuche der verschiedenen Anflugverfahren ein ähnliches Verhalten, wobei sich das LDLP-Verfahren von den restlichen Anflügen bereits abgrenzt. Bis zu einer Entfernung von 12 NM zur Schwelle liegen die Kurven von CDA*, OLDLP- und SCDA-Verfahren weiterhin nahezu übereinander. Während sich die Kurven des CDA*- und OLDLP-Verfahrens bis zur Stabilisierungshöhe (ca. 3,1 NM) nicht signifikant unterscheiden, steigt der Treibstoffverbrauch des SCDA soweit an, dass es bei 6 NM Entfernung die Kurve des ACDA-Verfahrens schneidet. Der ähnliche Verlauf der mittleren CDA*- und OLDLP-Verbräuche ist auf die gleiche N1 Leerlaufdrehzahlbedingung zurückzuführen.

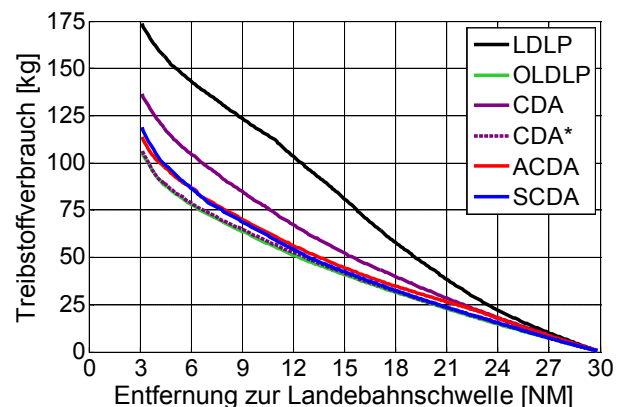


BILD 7. Mittlerer Treibstoffverbrauch der Anflugverfahren

Der Treibstoffverlauf des CDA- Verfahrens grenzt sich ab ungefähr 21 NM von der des ACDA-Verfahrens ab und bleibt im weiteren Verlauf darüber. Bereits in diesem Bereich erhalten die Piloten oftmals Geschwindigkeitsvorgaben von der Luftverkehrskontrolle. Befindet sich das Flugzeug beim CDA-Verfahren im Shared Energy Segment mit einem betragsmäßig kleinen Bahnneigungswinkel, ist eine Erhöhung des Schubes für eine konstante Fluggeschwindigkeit notwendig, woraus ein höherer Treibstoffverbrauch resultiert. Zu jeder Distanz nimmt der Treibstoffverbrauch des LDLP-Verfahrens den höchsten Wert an, da LDLP-Anflüge im Vergleich zu den CDA- und OLDLP-Verfahren über eine größere Distanz hohe N1 Drehzahlen aufweisen. Besonders zwischen 24 NM und 12 NM besitzt der Treibstoffverbrauch der LDLP-Anflüge eine große Steigung. In diesem Bereich befindet sich ein Großteil der LDLP-Anflüge im Horizontalflug, woraus eine Erhöhung des Schubes zur Aufrechterhaltung der Fluggeschwindigkeit resultiert.

3.2 Einflüsse auf den Treibstoffverbrauch

3.2.1 Flugzeuggewicht

Der Einfluss des Flugzeuggewichts spiegelt sich signifikant bei Anflugsegmenten wieder, in denen die Triebwerke nicht im Leerlauf betrieben werden. Wenn das Flugzeug in der Zwischenanflughöhe stationär horizontal fliegt, ist der Treibstoffverbrauch proportional zum Flugzeuggewicht. BILD 8 zeigt die Flugzeuggewichte in 30 NM Entfernung zur Landebahnschwelle.

Es ist ein besonders starkes Streuverhalten der Flugzeuggewichte zwischen 41,7t und 70t bei den LDLP-Verfahren erkennbar. Wobei die niedrigsten 25% der Flugzeuggewichte zwischen 41,7t und 60,7t liegen. Bei der Betrachtung aller Anflugverfahren ist festzustellen, dass der Quartilabstand der Flugzeuggewichte lediglich 2,9t beträgt, da das Minimum der 25%-Quartile 60,7t und das Maximum der 75%-Quartile 63,6t beträgt. Folglich landen 50% der Flugzeuge in diesem Gewichtsbereich. Die schwersten 25% der Flugzeuge sind durch das maximale Landegewicht limitiert. Zwei LDLP-Anflüge überschreiten das maximale Landegewicht, da beide Flüge unmittelbar nach dem Start zum Abflugflughafen zurückgefliegen und gelandet.

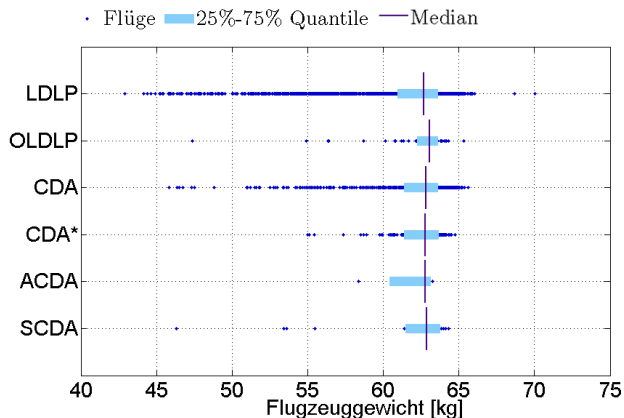


BILD 8. Flugzeuggewichte, gruppiert nach Anflugverfahren

Der Anteil der 25% leichtesten Anflüge, dessen Treibstoffverbrauch sich im unteren Quartil des Treibstoffverbrauchs befindet, beträgt bei LDLP-Verfahren 26,1% und bei CDA-Verfahren 23,1%. Dagegen nimmt der Anteil der 25% schwersten Anflüge, dessen Treibstoffverbrauch sich im oberen Quartil des Treibstoffverbrauchs befindet, bei LDLP-Verfahren 29,9% und bei CDA Verfahren 32,6% ein.

3.2.2 Konfigurationsmanagement

BILD 9 zeigt bei welcher Entfernung zur Landebahnschwelle wieviel Prozent der Anflüge Flaps 5 setzte bzw. das Fahrwerk per Betätigung des Hebels ausfuhr. Die ACDA- und SCDA-Verfahren sind aufgrund der geringen Anfluganzahl aus der näheren Betrachtung ausgeschlossen. 75% der LDLP-Anflüge setzen die Klappenkonfiguration 5 zwischen 11 NM und 27 NM. Dieser signifikante Entfernungsbereich ist auf 2 Ursachen zurückzuführen: Erstens, die geforderte Fluggeschwindigkeitsbeschränkungen seitens der Luftverkehrskontrolle; Zweitens, das pilotenindividuelle Verhalten. Das Verhalten bei CDA-Anflügen entspricht den Erwartungen, da die Fluggeschwindigkeit während des Sinkfluges früher reduziert werden muss und somit auch die Hochauftriebshilfen früher gesetzt werden müssen. Das Anfliegen ohne Geschwindigkeitsvorgaben erhöht die Wahrscheinlichkeit einen OLDLP oder CDA*-Anflug auszuführen. Die Piloten gestalten das Geschwindigkeitsmanagement selbst, was sich in kleineren und kompakteren Ausfahrtentfernungen der Klappenkonfiguration 5 widerspiegelt, wie beispielsweise bei den OLDLP-Verfahren zwischen 10,5 NM und 17 NM. Die untere Darstellung im BILD 9 veranschaulicht für die verschiedenen Verfahren wie hoch der Anteil der

Anflüge ist, die bei der jeweiligen Entfernung den Fahrwerkshebel in 'Gear Down' Stellung gebracht haben.

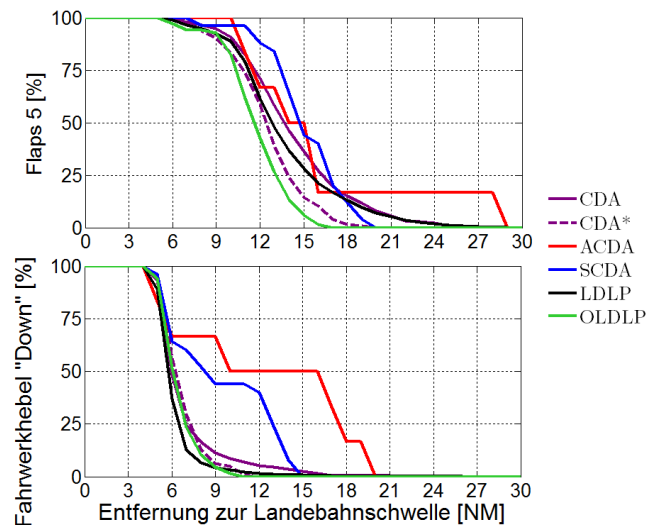


BILD 9. Kumulierte Häufigkeit Flaps 5 und Fahrwerk

Besonders bei steilen kontinuierlichen Anflugverfahren (SCDA, ACDA) wird das Fahrwerk zur Widerstandserhöhung eingesetzt, sodass ein früherer Ausfahrtzeitpunkt zu erwarten ist, was jedoch aufgrund der geringen Anfluganzahl statistisch nicht belegbar ist. CDA-, CDA*, LDLP-Anflüge beginnen bereits bei 17NM zur Schwelle das Fahrwerk auszufahren, wobei 50% der Anflüge mit LDLP bei 5,75 NM, CDA bei 5,95 NM, CDA* bei 6,2 NM und OLDLP bei 6,05 NM das Fahrwerk ausfahren. Insgesamt weisen die Verläufe der CDA-, CDA*, LDLP- und OLDLP-Verfahren zwischen 5 NM und 8 NM einen steilen Anstieg vor, sodass innerhalb dieser 3 NM ca. 80% der Anflüge das Fahrwerk setzen. Betrachtet man die 25% der Anflüge mit dem größten Treibstoffverbrauch, korrelieren 31,8% der 25% der LDLP-Anflüge, die das Fahrwerk am weitesten von der Landebahnschwelle ausfahren, mit diesen Anflügen. Bei den CDA-Verfahren sind es hingegen 38,2% unter gleichen Randbedingungen. Die sparsamsten 25% der Anflüge hingegen, beinhalten 23,9% bzw. 23,7% der LDLP- bzw. CDA-Anflüge, die die 25% kleinsten Entfernung zur Landebahnschwelle beim Ausfahren des Fahrwerks aufweisen. Folglich ist der Zeitpunkt des Fahrwerksetzens eine bedeutende Handlung mit signifikanten Auswirkungen auf den Treibstoffverbrauch. Das frühe Ausfahren ist energetisch nicht optimal und führt auf ein Verbesserungspotential im Energie- bzw. Konfigurationsmanagement hin.

4. VERBESSERUNG DES ENERGIEMANAGEMENTS

Um das zu frühzeitige oder zu späte Setzen der gewünschten Konfiguration in Abhängigkeit der aktuellen Randbedingungen zu verhindern, entwickelt und erprobt das DLR das Pilotenassistenzsystem Low Noise Augmentation System (LNAS) für LDLP-Anflüge. Das System zeigt dem Piloten über ein energiebasiertes Display im Cockpit den optimalen Zeitpunkt für nötige Konfigurationsänderungen an (vgl. BILD 10). Diese Anzeige auf dem Electronic Flight Bag (EFB), die durch ihre einfache Darstellung intuitiv und auf einen Blick erfasst werden kann, dient als

langfristige Planungsgrundlage für den gesamten Anflug. Das ideale Anflugprofil ist dabei in unterschiedliche Phasen aufgeteilt. Die optimalen Zeitpunkte für das Setzen der Landeklappen und das Ausfahren des Fahrwerks sind im Anflugprofil jeweils markiert. Handelt der Pilot nach diesen Vorgaben, kann der Anflug von der Reiseflughöhe bis hinunter auf die Stabilisierungshöhe von 1.000 ft über Grund mit minimalem Schub und damit möglichst geringer Geräuschentwicklung und möglichst geringem Treibstoffverbrauch durchgeführt werden. Das Pilotenassistenzsystem LNAS absolvierte 2016 erfolgreich die ersten Flugversuche im alltäglichen Hochbetrieb am Frankfurter Flughafen. An Bord des DLR-Forschungsflugzeugs A320 ATRA wurden in fünf Versuchsreihen insgesamt 74 Anflüge durchgeführt. Insbesondere in schwierigen Situationen, wie beispielsweise bei starkem Rückenwind oder hohen Geschwindigkeitsvorgaben durch die Luftverkehrskontrolle, war das Assistenzsystem eine große Hilfe für die Piloten.

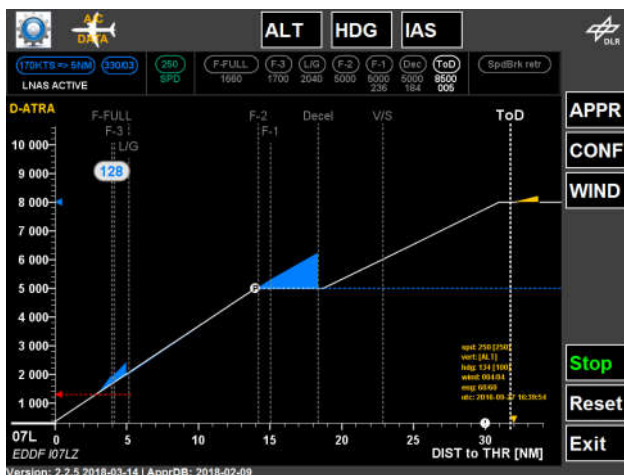


BILD 10. Benutzeroberfläche von LNAS

Eine Langzeiterprobung des LNAS findet derzeit mit der Deutschen Lufthansa mit bis zu 86 Flugzeugen der A320-Familie statt. Zu Beginn wurden Softwareintegrations- und Integrationsflüge sowie Voruntersuchungsflüge im regulären Flugbetrieb durch eine Gruppe ausgewählter Lufthansapiloten erfolgreich durchgeführt. Derzeit wird der Test auf alle A320-Piloten der Lufthansa ausgeweitet. Darüber hinaus soll LNAS in Zukunft für weitere Anflugverfahren erweitert werden. Wie bereits in Kapitel 3 gezeigt, besteht Handlungsbedarf bei der Optimierung der CDA-Anflüge, sodass diese möglichst im Triebwerksleerlauf durchgeführt werden können. Mittels Simulatorkampagnen sowie realen Flugversuchen soll die Wirksamkeit des optimierten CDA-Anflugverfahrens nachgewiesen werden.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Auf den 30 NM zur Landebahnschwelle bis zur Stabilisierungshöhe von 1.000 ft verbraucht das OLDLP-Anflugverfahren erwartungsgemäß am wenigsten Treibstoff. Auch der Vergleich mit dem CDA*-Anflugverfahren mit gleichen Triebwerksleerlaufbedingungen ergibt einen sparsameren Anflug, aufgrund der höheren Fluggeschwindigkeiten und damit der kürzeren Anflugdauer für das OLDLP-Anflugverfahren. In dieser Untersuchung wurde das LDLP-Verfahren als das Verfahren mit dem

größten Treibstoffverbrauch festgestellt. Dies liegt mitunter an den langen Horizontalflugabschnitten, die für das Halten der Flughöhe ein höheres Schubniveau als Leerlauf erfordern. Auch die aufgrund der niedrigen Fluggeschwindigkeit folgende frühe Konfiguration des Flugzeugs erhöht den Treibstoffbedarf von LDLP-Anflügen, da lange in einer energetisch ungünstigen Konfiguration horizontal geflogen wird. Die kontinuierlichen Anflugverfahren weisen weitere Schwierigkeiten in Segmenten des gleichzeitigen Abbaus von potentieller und kinetischer Energie auf. Das CDA-Anflugverfahren gilt allgemein als treibstoffsparend und lärmarm, wobei die Ergebnisse (vgl. Kapitel 3.1) zeigen, dass es teilweise bis zu 60 kg mehr Kerosin benötigt als der mittlere LDLP-Anflug mit 171 kg. Bei Anflügen mit den höchsten Treibstoffverbräuchen konnte ein Ausfahren des Fahrwerks weit vor dem Gleitpfadeinflug, teilweise für den kurzzeitigen Abbau der Fluggeschwindigkeit, festgestellt werden. Besonders wenn auf das weit von der Landebahnschwelle entfernte Ausfahren des Fahrwerks ein langer horizontaler Flugabschnitt langsamer Fluggeschwindigkeit folgt, führt diese Kombination bis zu einem vierfachen Treibstoffverbrauch und sollte folglich vermieden werden. Bei dem CDA Anflugverfahren führt das frühe Ausfahren des Fahrwerks verbunden mit niedrigen Fluggeschwindigkeiten zu einem dreieinhalbfachen Treibstoffverbrauch. Ziel ist es, die Anflüge bis zur Stabilisierungshöhe im Triebwerksleerlauf, ohne unnötigen Bremsklappeneinsatz und mit den Konfigurationsänderungen so spät wie möglich (d.h., so nah wie möglich an der Landebahnschwelle) auszuführen. Dies erfordert eine softwareseitige Unterstützung des Piloten (vgl. Kapitel 4), sodass der Pilot über den aktuellen sowie den weiteren Verlauf des Energiehaushalts des Flugzeuges in Kenntnis ist und dementsprechende Handlungsempfehlungen zur Verfügung stehen.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] DFS, „LIZ Annual Summary,“ DFS Situation and Information Centre, 2017.
- [2] Flughafen München, „Flughafen mit Verantwortung,“ [Online]. Available: <https://www.munich-airport.de/umweltschutz-86890>. [Zugriff am 22. Juni 2018].
- [3] Flughafen München, „Flughafen mit Verantwortung,“ [Online]. Available: <https://www.munich-airport.de/luftgute-87288>. [Zugriff am 22. Juni 2018].
- [4] F. Abdelmoula, M. Scholz and C. G. Kühne, "Erprobung und Bewertung des Low Noise Augmentation System (LNAS)," Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Braunschweig, 2017.
- [5] ICAO, „Noise Abatement Procedures: Review of Research, Development and Implementation Projects-Discussion of Survey Results,“ 2010.
- [6] ICAO, „Guidance on the Balanced Approach to Aircraft Noise Management,“ 2008.